废弃露天坑下深部复杂矿体采场结构参数优化研究①

钱兆明[1,2], 郑斌[1,2], 张来鑫[1,2], 欧阳剑[3], 邱贤阳[3], 曹日红[3], 史秀志[3]
(1.中国有色矿业集团有限公司, 北京 100029; 2.刚波夫矿业股份有限公司, 刚果(金) 加丹加 利卡西 999059; 3.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 针对刚果(金)MSESA 废弃露天坑下深部复杂地质矿体采场结构参数优化问题,提出了融合三维岩体质量 Q 值模型与 Mathews 稳定图解法的分析方法,通过岩石力学试验构建了矿区三维岩体质量 Q 值模型,基于 Mathews 稳定图解法,建立采场水力半径与稳定系数的量化关系,并在极限允许水力半径条件下,选取合理的采场结构参数。结果表明,+500 勘探线以北区域采用分段空场嗣后充填采矿法,无支护条件下,采场垂直走向布置时结构参数宜为 35 m × 8 m × 45 m,沿走向布置时结构参数宜为 20 m × 9 m × 45 m;+500勘探线以南区域需采用顶板支护,采场结构参数宜为 17 m × 8 m × 15 m。

关键词: 露天转地下; 深部开采; 露天坑; 采矿方法; 分段空场嗣后充填法; 采场结构; Mathews 稳定图解法; 岩体质量分级; 采场稳定性; Q 系统图解法
中图分类号: TD853 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.016
文章编号: 0253-6099(2026)03-0122-08

Optimization of Stope Structural Parameters for Deep Complex Orebodies Beneath Abandoned Open Pits

QIAN Zhaoming[1,2], ZHENG Bin[1,2], ZHANG Laixin[1,2], OUYANG Jian[3], QIU Xianyang[3], CAO Rihong[3], SHI Xiuzhi[3]
(1. *China Nonferrous Metal Mining (Group) Co., Ltd., Beijing* 100029, *China*; 2. *Kambove Mining SAS, Likasi* 999059, *Katanga, DRC*; 3. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: To address the optimization of stope structural parameters for the deep complex geological orebody beneath the abandoned MSESA open pit in the DRC, an analytical method was proposed, integrating the 3D rock mass quality Q-value model and the Mathews stability graph method. Through rock mechanics tests, a 3D rock mass quality Q-value model of the mining area was constructed. Based on the Mathews stability graph method, the quantitative relationship between the stope hydraulic radius and the stability factor was established, and reasonable stope structural parameters under the condition of the critical allowable hydraulic radius were selected. The results show that for the area north of the +500 exploration line, where the sublevel open stoping with subsequent backfilling method is adopted, the structural parameters should be 35 m × 8 m × 45 m when the stope is arranged perpendicular to the strike under unsupported conditions, and 20 m × 9 m × 45 m when arranged along the strike. In the area south of the +500 exploration line, roof support is required and the optimal stope structural parameters should be 17 m × 8 m × 15 m.

Key words: open-pit to underground transition; deep mining; open pit; mining method; sublevel open stoping with subsequent backfilling; stope structure; Mathews stability graph method; rock mass quality classification; stope stability; Q-system graph method

随着矿产资源开发逐步向深部及复杂地质条件区域延伸,采场结构参数的合理确定已成为保障地下矿山安全高效开采的关键问题[1-2]。采场结构参数直接影响矿石回采率、围岩暴露范围、应力重分布和顶板稳定性。采场结构参数过大易诱发顶板冒落、边帮片帮及围岩失稳,过小则会降低回采率并增加采准工程量。

① **收稿日期**: 2025-12-06
基金项目: 中国博士后科学基金面上资助(2024M752145)
作者简介: 钱兆明(1981—),男,江苏泰州人,博士,高级工程师,主要从事矿山生产、矿山技术及安全管理工作。E-mail:778994916@qq.com

因此,选择兼顾安全性与经济性的采场结构参数具有重要工程意义。

目前,确定采场结构参数主要采用理论解析法[3]、工程经验类比法[4]、综合分析法[5]和数值模拟法[6]等。理论解析法能够从力学角度描述采场围岩的应力与变形规律,但通常需要较强的边界和介质均质化假设[7-8],难以充分反映复杂地质体的空间非均质性。工程经验类比法依据相似矿山案例进行参数选取,操作简便,但受经验条件限制较大,所得结果往往偏于保守[9]。综合分析法通过建立采场结构参数与岩体质量、地应力、节理裂隙等因素之间的数学关系,提高参数选取的定量化水平,但模型可靠性依赖于样本数据和指标体系的完整性[10]。数值模拟法能够较直观地反映采场开挖后的应力调整与变形破坏过程,但其结果受本构模型、边界条件及参数选取影响较大[11]。相比之下,半经验图解方法,如 Mathews 稳定图解法、临界跨度图解法、Barton Q 系统等,能够将岩体质量、应力状态和采场几何尺寸联系起来,在地下矿山采场稳定性评价和结构参数初选中应用较为广泛。

刚果(金)MSESA 废弃露天坑下深部复杂矿体的岩体质量受岩性组合、构造破碎、水岩劣化和开采扰动等因素共同影响,单一经验参数可能导致局部稳定性评价偏差,而三维岩体质量分级模型可刻画岩体质量空间分布。Mathews 稳定图解法可将岩体质量、应力状态、结构面方位和采场水力半径联系起来,为确定不同暴露面条件下的采场结构参数提供依据。

本文以该矿区为工程背景,基于岩石力学试验、钻孔资料及岩体结构调查,构建三维岩体质量 Q 值模型,并结合 Mathews 稳定图解法求解采场各暴露面稳定性系数与允许水力半径,结合矿体赋存形态及分段空场嗣后充填采矿工艺,提出分区域采场结构参数优化方案,实现岩体质量空间识别与采场结构参数优化的有效衔接,研究成果可为同类复杂矿体的采场设计提供借鉴。

1　工程背景

位于刚果(金)利卡西市的 MSESA 废弃露天边坡经过长达 50 年的泡水侵蚀,边坡岩体浸泡软化,岩体质量降低、劣化,露天矿坑现有水量(350~500)万 m^3,坑底沉积淤泥近 200 万 m^3,项目工程地质条件及开采技术条件极其复杂。矿床地质勘查实践表明,MSESA 地下矿体位于塞萨挤压断层地带,断层、破碎带结构较发育。MSESA 矿体与露天坑位置关系如图 1 所示。

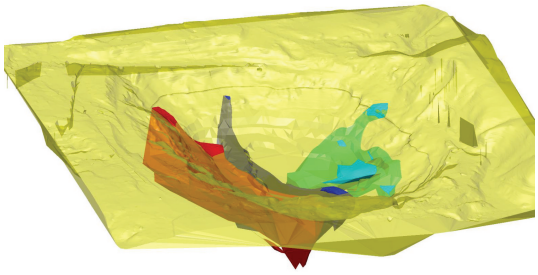


图 1　MSESA 矿体与露天坑位置关系

Fig. 1　Spatial relationship between MSESA orebody and open pit

MSESA 坑下共圈定 4 个铜矿体(群),矿体分布如图 2 所示,总体呈层状产出。1 号矿体(RSF+SD 层)呈层状、似层状产出,倾向约 65°,倾角约 70°,走向长度约 440 m,倾向延深约 270 m,平均厚度约 28.07 m。2 号矿体(CMN 层底部)呈透镜体状、似层状产出,倾向约 270°,倾角约 45°,走向长度约 279 m,倾向延深约 250 m,平均厚度约 19.85 m。3 号矿体(CMN 层中间)呈层状、似层状产出,整体走向约 160°,倾角较陡,走向长度约 330 m,倾向长度约 200 m,平均厚度 10.05 m。4 号矿体群为多个小矿体,体积较小,大多受单工程控制。经探明,坑下矿石总可采储量为 415.6 万 t,含铜金属量 161 513.4 t。

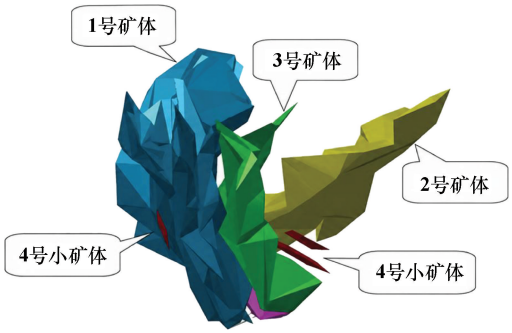


图 2　MSESA 矿体分布示意图

Fig. 2　Schematic diagram of MSESA orebody distribution

为实现 MSESA 铜钴矿坑底剩余资源的安全高效开采,须探明长期水侵蚀下岩石力学强度劣化规律,以及水岩作用下岩石强度弱化影响范围。基于力学试验参数和岩体结构调查,开展长期水影响下的岩体质量评价,为制定矿山开采方案提供依据。

MSESA 矿区主要包含 7 个地层,分别为 CMN、KU、SD、RSC、RSF、RAT、BR,对应的主要岩性分别为碳质泥岩、泥质粉砂岩、白云岩、孔洞状硅质白云岩、条带状硅质白云岩、砂砾岩、构造角砾岩。选择露天坑不同区域、不同高度台阶和不同深度的岩石试样开展岩石物理力学性质测试,结果如表 1 所示。

表 1 岩石主要物理力学性质

Table 1 Main physical and mechanical properties of rocks

地层	密度/(t·m^{-3})	抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
SD	2.76	36.79	11.70	67.3
KU	2.68	25.02	6.72	45.5
RSC	2.57	64.37	10.37	56.2
CMN	2.25	46.69	5.58	51.3
RAT	2.25	9.32	2.88	60.4
RSF	2.76	26.80	6.45	52.7
BR	1.98	8.22	1.16	42.7

2 三维岩体质量 Q 值模型

采用单轴抗压强度、三轴抗压强度、岩体纵波波速、抗拉强度、节理面粗糙度、体积节理数、渗透系数等参数作为岩体质量评价指标,进行岩体质量分级评价,如表 2 所示。

表 2 Q 系统分级评价

Table 2 Q-system classification evaluation

Q 值	分级	描述
>40	Ⅰ	非常好岩体
10~40	Ⅱ	好岩体
4~10	Ⅲ	一般岩体
1~4	Ⅳ	差岩体
<1	Ⅴ	非常差岩体

依据 9 个斜孔以及 12 个垂直钻孔岩心统计结果(如图 3 所示),构建岩体三维岩体质量 Q 值模型,如图 4 所示。由图 4 可知,MSESA 矿区露天坑往下延伸,岩体质量分布错综复杂,露天坑西边往下岩体质量呈层叠分布特性,属于Ⅱ级岩体。露天坑西北角与西南角均存在一个破碎区域,西南角破碎区域较西北角大,目前已出现较大范围的滑塌,从滑塌所揭露的情况来看,基本属于土石混合体,这与 Q 值模型结果一致。同时,露天坑西北角的土石体基本处于揭露状态,与模型方位一致。整体而言,露天坑北边岩体质量相对较好,是井下开采潜在开拓工程布置区域。

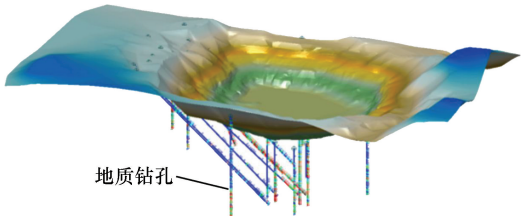


图 3 地质钻孔数据库

Fig. 3 Geological borehole database

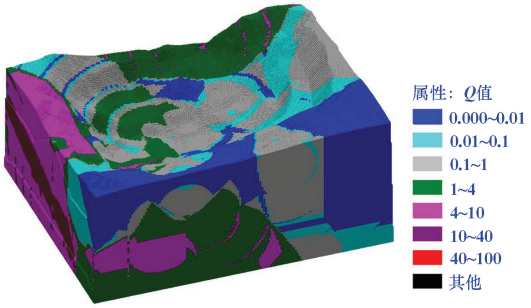


图 4 三维岩体质量 Q 值模型

Fig. 4 3D rock mass quality Q-value model

图 5 为不同勘探线剖面下矿区岩体 Q 值分布,+350勘探线附近坡面下的岩体质量跟表层一致,随着往+650 勘探线推进,在+400 勘探线附近边坡下部岩体开始出现转变,直至+500 勘探线坑底较深部岩体转为Ⅲ级岩体。从 Q 值分类结果来看,MSESA 矿区Ⅳ级与Ⅴ级岩体较为普遍,Ⅲ级岩体较少,Ⅱ级岩体极少,只在+450 勘探线以下较深区域以层叠的形式出现。

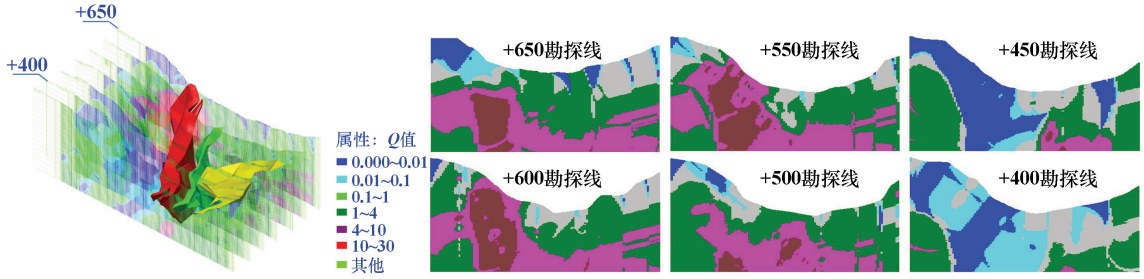


图 5 不同勘探线剖面下的岩体 Q 值分布

Fig. 5 Rock mass Q-value distribution under different exploration line profiles

3 Mathews 稳定图解法

Mathews 稳定图解法是基于 Q 系统的半经验方法,核心是区分稳定、破坏与严重破坏 3 个区域的图解,如图 6 所示。

通过岩体稳定性系数(N)和表征结构尺寸的水力半径(S),综合评估采场在不同地质和几何参数下的稳定性状况。

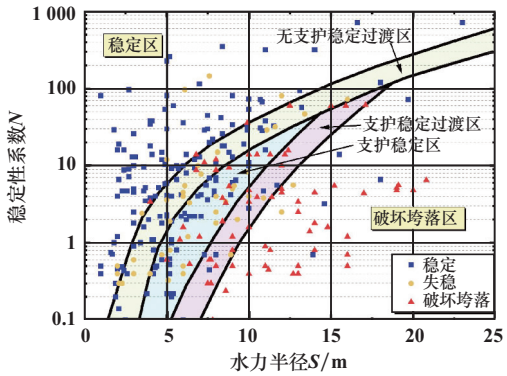


图 6　修正的 Mathews 稳定图

Fig. 6　Modified Mathews stability graph

$$N = Q' \times A \times B \times C \tag{1}$$

$$S = \frac{a \times b}{2(a + b)} \tag{2}$$

式中:Q'为反映岩体性质的质量指数;A 为应力系数;B 为表征岩体缺陷(如节理裂隙)空间方位的修正系数;C 为表征采场暴露面空间方位的修正系数;a 为采场宽度,m;b 为采场长度,m。

当采场形状比较复杂时,文献[12]建议使用半径因子(壁面中心至其端部的平均距离)来更好地描述几何形状对采场稳定性的影响。

A 值由完整岩石单轴抗压强度 σ_c 与采场中线垂直诱导压应力 σ_i 的比值确定,其计算公式为:

$$A = \begin{cases} 0 & \sigma_c/\sigma_i < 2 \\ 0.112\,5\dfrac{\sigma_c}{\sigma_i} - 0.125 & 2 \leqslant \sigma_c/\sigma_i \leqslant 10 \\ 1 & \sigma_c/\sigma_i > 10 \end{cases} \tag{3}$$

B值根据图7确定,当关键节理与开挖面的夹角为 90°时,B 取 1.0[13]。暴露面方位修正系数 C 的取值取决于暴露面与水平面的夹角:$C = 8 - 6\cos\alpha$。

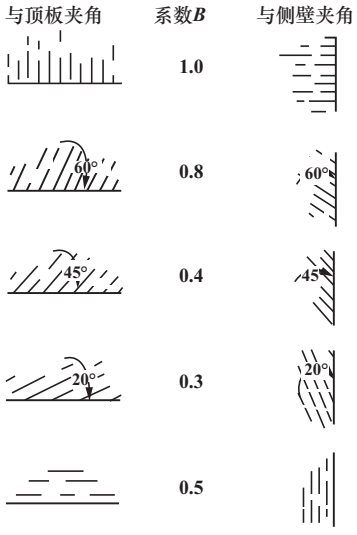


图 7　B 值图解

Fig. 7　B-value diagram

4　基于 Mathews 稳定图解法的采场结构参数优化

4.1　原岩应力

根据矿体开采设计,计划采用分段空场嗣后充填采矿法对露天坑底资源进行回采,因此需要对该处回采区域的应力条件和结构面分布特征进行分析。矿区尚未开展原位应力测量,因此根据世界各国平均水平应力与垂直应力的关系[14],取南非地区的平均水平应力与垂直应力关系进行计算,取最大水平应力与垂直应力比值为 2.8,最小水平应力与垂直应力比值为 1.8,垂直应力按上覆岩层重力计算。根据区域构造与断层分布情况,可以确定最大水平应力垂直矿体走向,最小水平应力平行矿体走向。矿坑底部淤泥标高约为 1 250 m,根据垂直应力水平计算 MSESA 坑底 1 050 m 中段水平垂直应力为 4.6 MPa,由此可以计算得到 1 050 m 标高的最大水平应力为 12.88 MPa,最小水平应力为 8.28 MPa。

4.2　关键不连续性结构面

矿坑断层走向如图 8 所示。区域构造运动较为强烈,褶皱、断层相当发育,构造形迹展布与外褶带基本一致。塞萨挤压断层呈北西-南东向,长约 6.2 km,断层呈波状延伸,地表倾角较陡,约 80°。矿区内主要出露一条北北西-南南东走向的区域性断裂,分布于矿区中西部,贯穿矿区南北,倾向西,产状近于直立,该断裂在区域上与成矿存在紧密联系。

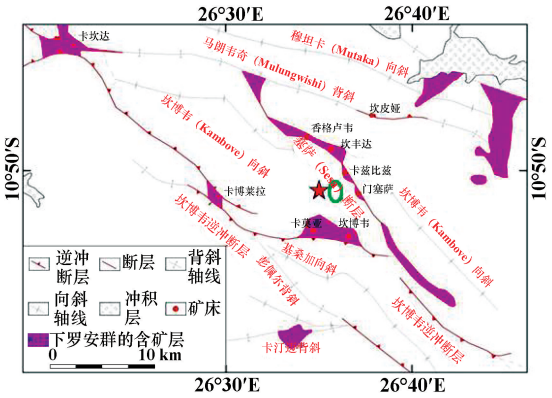


图 8　矿坑断层走向

Fig. 8　Fault strike of open pit

4.3　Mathews 稳定图解评价分析

针对单个采场的上、下盘,边帮和顶板等部位,结合不同地层岩体的物理力学参数,计算 Mathews 稳定图解中需要的影响因子。由于不同区域矿岩性质及岩

体质量差异显著,依据三维 Q 值模型的分级结果,以+500 勘探线为界将研究区划分为南、北两个稳定性评价区域,并分别开展采场结构参数优化计算。将根据图 5 的统计结果计算得到的 N 值置入 Mathews 稳定图中,可以确定极限状态下不同采场部位的水力半径,如图 9和图 10 所示。针对性地优化采场在此布置方式下的结构参数。为方便取值,对 Mathews 稳定图中的临界曲线进行拟合,获得无支护稳定区、无支护稳定过渡区、支护稳定区和支护稳定过渡区等区域的分界线上稳定性系数 N 与水力半径 S 的函数关系。

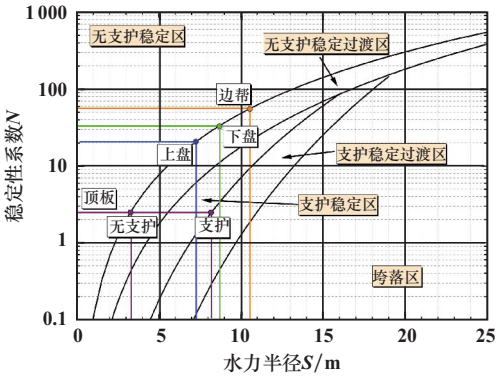


图 9 +500 勘探线以北采场评价结果

Fig. 9 Evaluation results of stope north of +500 exploration line

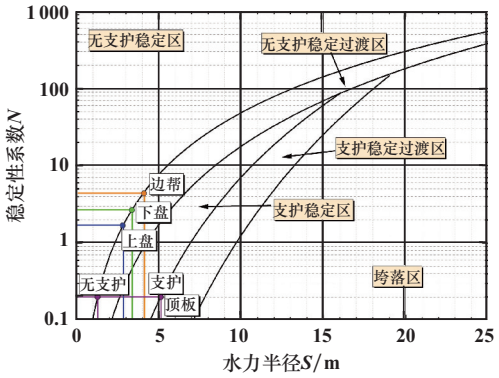


图 10 +500 勘探线以南采场评价结果

Fig. 10 Evaluation results of stope south of +500 exploration line

无支护稳定区和无支护稳定过渡区之间的临界曲线为:

$$\lg N = -0.965 + 2.65 \times \lg S \quad (4)$$

无支护稳定过渡区域和支护稳定区之间的临界曲线为:

$$\lg N = -2.1 + 3.35 \times \lg S \quad (5)$$

支护稳定区和支护稳定过渡区之间的临界曲线为:

$$\lg N = -4.45 + 5.3 \times \lg S \quad (6)$$

通过构建的三维岩体质量 Q 值模型可获得不同区域地质条件下的 Q 值,不同区域岩体呈现较大的强度差异,因此以+500 勘探线为界,分别进行允许水力半径计算。选取顶板无支护和支护 2 种条件下的水力半径,根据式(4)~(6)计算边帮和上、下盘无支护条件下的水力半径,计算结果见表 3 和表 4。

表 3 +500 勘探线以北水力半径计算结果

Table 3 Calculation results of hydraulic radius north of +500 exploration line

区域	Q'	A	B	C	N	S/m
顶板	7	0.24	0.75	2.0	2.5	3.27
下盘	7	1.00	0.75	6.5	34.1	8.76
上盘	7	1.00	0.45	6.5	20.5	7.23
边帮	7	1.00	1.00	8.0	56.0	10.56

表 4 +500 勘探线以南水力半径计算结果

Table 4 Calculation results of hydraulic radius south of +500 exploration line

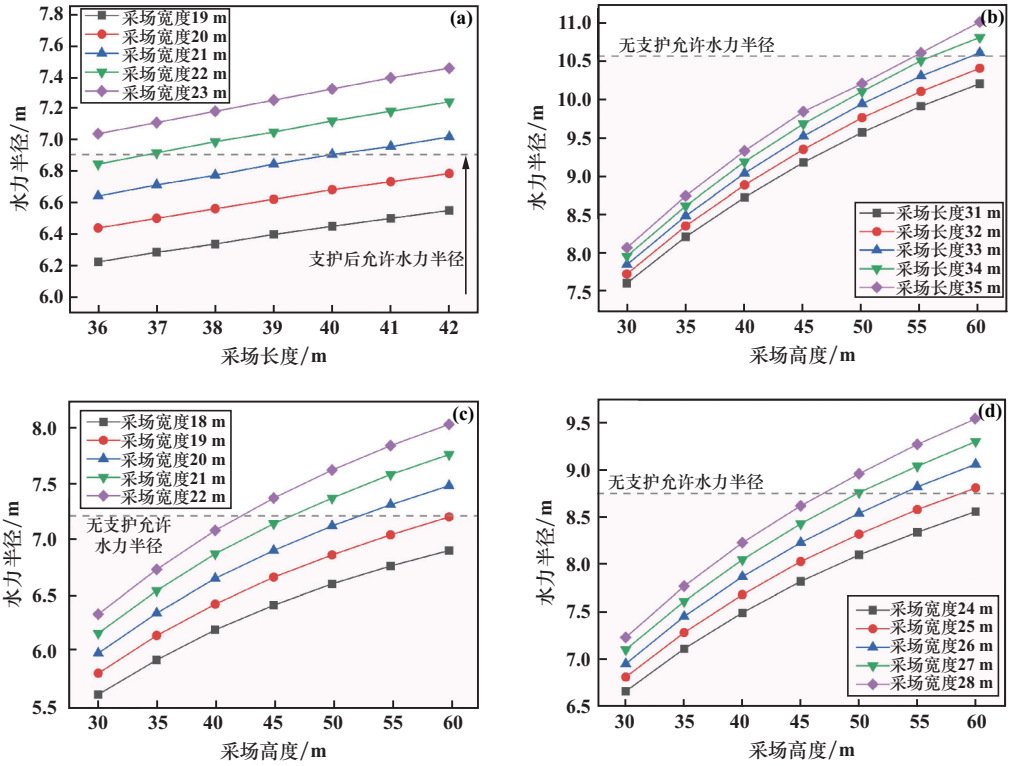
区域	Q'	A	B	C	N	S/m
顶板	0.55	0.24	0.75	2.0	0.20	3.85
下盘	0.55	1.00	0.75	6.5	2.70	3.36
上盘	0.55	1.00	0.45	6.5	1.61	2.77
边帮	0.55	1.00	1.00	8.0	4.40	4.05

4.4 采场结构参数优化

为了确定适当的采场尺寸,根据 Mathews 稳定图中临界曲线确定的允许水力半径值来确定合理的采场结构参数,结果如图 11 和图 12 所示。通过对采场不同位置的暴露面进行水力半径设计,调节采场顶板长、宽或者上盘和下盘高、宽等几何尺寸参数,计算其对应的水力半径,在计算的允许水力半径约束下,获得合理的结构参数取值范围。其中,顶板允许水力半径为支护条件下的计算值,边帮和上、下盘为无支护条件下的计算值。

对于+500 勘探线以北区域,当采场宽度取 21 m、长度取 40 m 时,顶板水力半径逼近支护条件下的允许极限;同时,在采场高度取 45 m、宽度保持 21 m 时,其边帮、上盘及下盘的水力半径亦满足无支护条件下的允许值。综合顶板、边帮及上下盘的水力半径约束条件,最终确定合理的采场结构参数为长 40 m、宽 21 m、高 45 m,既确保了所有暴露面均满足稳定性,又实现了采场空间的最大化。同理,根据图 12,对+500勘探线以南区域采场结构参数进行选择,结果见表 5。

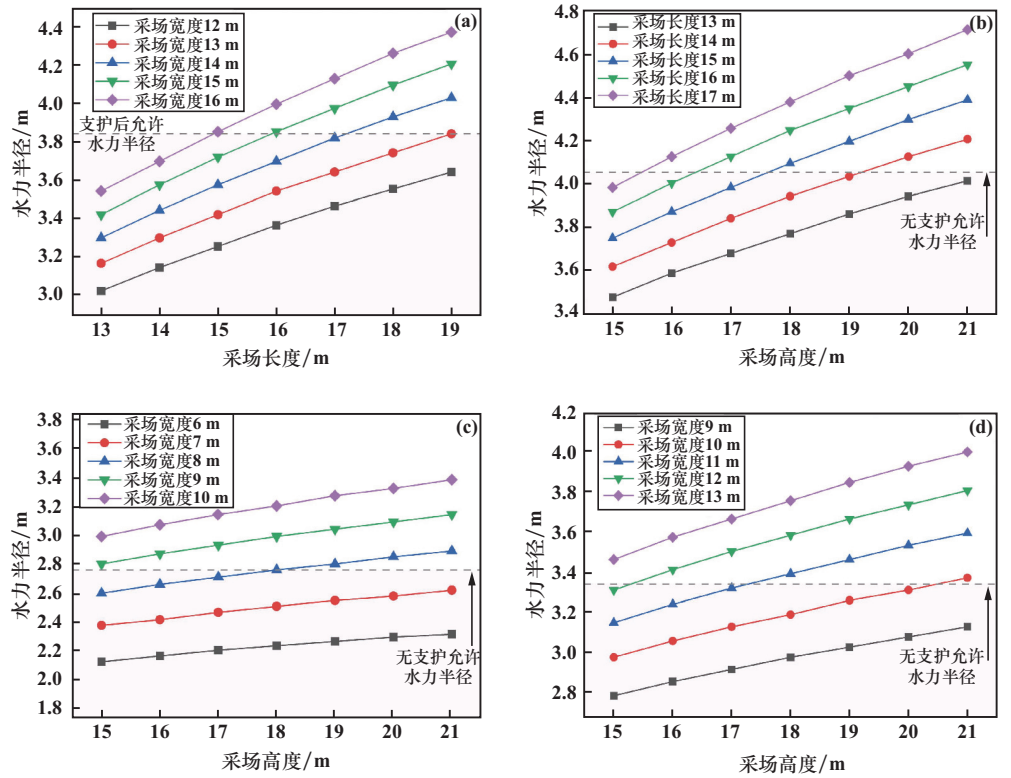
+500 勘探线南北矿体性质差异较大,根据评价结果,在支护条件下,+500 勘探线以北区域采用分段空场嗣后充填采矿法,阶段高度 45 m 时,采场结构最大参数为 40 m × 21 m × 45 m(分段 15 m)。但是MSESA



(a) 顶板; (b) 边帮; (c) 上盘; (d) 下盘

图 11　+500 勘探线以北采场尺寸优化图解(阶段 45 m,分段 15 m)

Fig. 11　Dimension optimization diagram of stope north of +500 exploration line (bench height 45 m, sublevel height 15 m)



(a) 顶板; (b) 边帮; (c) 上盘; (d) 下盘

图 12　+500 勘探线以南采场尺寸优化图解

Fig. 12　Dimension optimization diagram of stope south of +500 exploration line

表5 顶板支护条件下基于Mathews稳定图解法的采场结构参数优化结果

Table 5 Optimization results of stope structural parameters based on Mathews stability graph method under roof support conditions

采场所属区域	采场结构参数		
	长度/m	宽度/m	高度/m
+500勘探线以北	40	21	45
+500勘探线以南	17	8	15

矿体分布从+500勘探线开始往北逐渐尖灭,矿体厚度逐渐减小,无法布置该采场结构,需调整分段空场嗣后充填采矿法的布置方式和结构参数来适应矿体的形态。因此在顶板支护条件下,可以设置以下3种采矿方法。

1)+500勘探线以北,分段空场嗣后充填采矿法,垂直走向布置,采场结构为40 m × 20 m × 45 m。

2)+500勘探线以北,分段空场嗣后充填采矿法,沿走向布置,采场结构为20 m × 矿体厚度 × 45 m。

3)+500勘探线以南,小空场嗣后充填采矿法,垂直走向布置,采场结构为17 m × 8 m × 15 m。

基于分段空场嗣后充填采矿法的工艺特征,在采准与切割阶段,采场无需开挖全断面凿岩硐室,可采用中深孔扇形布孔方式进行爆破落矿。因此,需重点评估无支护暴露面条件下的采场结构参数。鉴于其优选逻辑与支护条件下的分析过程一致,此处不予赘述。顶板无支护条件下基于Mathews稳定图解法的采场结构参数优化结果如表6所示。

表6 顶板无支护条件下基于Mathews稳定图解法的采场结构参数优化结果

Table 6 Optimization results of stope structural parameters based on Mathews stability graph method under unsupported conditions

采场所属区域	采场结构参数		
	长度/m	宽度/m	高度/m
+500勘探线以北(垂直走向)	35	8	45
+500勘探线以北(沿走向)	20	9	45
+500勘探线以南	15	3	17

由表6可知,+500勘探线以北,在45 m阶段高度下,35 m × 8 m的采场结构参数能保证垂直走向采场在无支护状态下的采空区稳定性;20 m × 9 m的采场结构参数能保证沿走向采场在无支护状态下的采空区稳定性。此时在采场回采工作中,仅限在凿岩硐室进路中钻凿扇形中深孔进行爆破落矿。

+500勘探线以南采场无支护条件下允许宽度仅3 m,符合凿岩巷道稳定跨度,但是整体来说采场结构参数过小,不适合布置采场,应采用支护条件下的采场结构参数。因此,+500勘探线以南区域宜采用小空场嗣后充填采矿法,在凿岩硐室全部形成后对采场顶板进行整体支护,并采用垂直中深孔爆破回采。

综上所述,结合矿体赋存形态、采场暴露面稳定性评价结果及分段空场嗣后充填法的工艺特征,确定不同区域的推荐采场结构参数如下:

1)+500勘探线以北矿体垂直走向布置时,宜采用分段空场嗣后充填采矿法,采场结构参数为35 m× 8 m × 45 m,采场空区顶板无需支护,采用扇形中深孔爆破落矿。

2)+500勘探线以北矿体沿走向布置时,宜采用分段空场嗣后充填采矿法,采场结构参数为20 m × 9 m × 45 m,采场空区顶板无需支护,采用扇形中深孔爆破落矿。

3)+500勘探线以南矿体宜采用小空场嗣后充填采矿法,并垂直矿体走向布置,采场结构参数为17 m × 8 m × 15 m。由于该区域岩体质量较差,采场空区顶板需支护,采用垂直中深孔爆破回采。

5 结论

1)构建三维岩体质量Q值模型,不同区域矿区岩体Q值评分结果差异较大,矿体南部岩体质量差,+500勘探线以北转为Ⅲ级岩体。MSESA矿区岩体中Ⅳ级与Ⅴ级岩体较为普遍,Ⅲ级岩体较少,Ⅱ级岩体极少。

2)针对不同区域岩体质量差异,结合地下开采工艺,考虑顶板支护条件,提出垂直走向、沿走向分段空场嗣后充填和小空场嗣后充填3种形式的采场布置方式和结构参数。

3)矿区+500勘探线以北,采场垂直走向布置时结构宜为35 m × 8 m × 45 m,沿走向布置时结构宜为20 m × 9 m × 45 m。矿区+500勘探线以南,采场宜垂直走向布置,结构宜为17 m × 8 m × 15 m。

参考文献(References):

[1] 李炎峰,刘志祥,闵晨笛. 金属矿深部采场结构参数的模糊层次分析综合评判优化[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):24-29.
LI Yanfeng, LIU Zhixiang, MIN Chendi. Comprehensive evaluation and optimization with F-AHP for structural parameters of stope at deeps of metal mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):24-29.

[2] 刘大可,张浩强,郭翔,等. 帕鲁特金矿破碎矿体嗣后充填采矿法采场结构参数优化[J]. 矿业研究与开发, 2025,45(1):32-40.
LIU Dake, ZHANG Haoqiang, GUO Xiang, et al. Optimization of stope structure parameters of subsequent filling mining method for broken ore body in Pakrut Gold Mine[J]. Mining Research and Development, 2025,45(1):32-40.

[3] 史红,姜福兴. 采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(18):3066-3069.
SHI Hong, JIANG Fuxing. Mechanical analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of longwall face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(18):3066-3069.

[4] 谭宝会,胡颖鹏,张志贵,等. 无底柱分段崩落法采场结构参数:发展现状、确定方法及存在的问题[J]. 化工矿物与加工, 2022,51(11):52-64.
TAN Baohui, HU Yingpeng, ZHANG Zhigui, et al. Development status and determination method and existing problems of stope structure parameters in sublevel caving without sill pillar[J]. Industrial Minerals & Processing, 2022,51(11):52-64.

[5] 来兴平,蔡美峰,张冰川. 神经网络计算在采场结构参数分析中的应用[J]. 煤炭学报, 2001,26(3):245-248.
LAI Xingping, CAI Meifeng, ZHANG Bingchuan. Application of nonlinear neural network to analyze the stope structure parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2001,26(3):245-248.

[6] 叶海旺,常剑,周磊. 基于 FLAC^{3D}的采场结构参数优化[J]. 金属矿山, 2010(12):6-8.
YE Haiwang, CHANG Jian, ZHOU Lei. Parameters optimization of stope structure based on FLAC^{3D}[J]. Metal Mine, 2010(12):6-8.

[7] 朱志岗,侯克鹏,孙华芬,等. 基于 3 种计算方法的采空区顶板稳定性综合分析[J]. 化工矿物与加工, 2020,49(5):11-14.
ZHU Zhigang, HOU Kepeng, SUN Huafen, et al. Comprehensive analysis of roof stability in goaf based on three calculation methods[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020,49(5):11-14.

[8] 罗周全,汪伟,谢承煜,等. 倾斜中厚矿体采场宽度优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015,46(10):3865-3871.
LUO Zhouquan, WANG Wei, XIE Chengyu, et al. Optimization of stope width of inclined medium thick ore body[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015,46(10):3865-3871.

[9] 赵兴东,周鑫,田斌,等. 西藏帮中锌铜矿采场结构参数优化[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):12-15.
ZHAO Xingdong,ZHOU Xin,TIAN Bin,et al. Optimization of stope structure parameters for Bangzhong zinc-copper mine in Xizang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):12-15.

[10] 周科平. 采场结构参数的遗传优化[J]. 矿业研究与开发, 2000,20(3):7-10.
ZHOU Keping. Genetic optimization of stope structure parameters[J]. Mining Research and Development, 2000,20(3):7-10.

[11] 马春德,徐家庆,刘焕新,等. 基于 ANSYS-FLAC^{3D}的深部采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(1):20-23.
MA Chunde, XU Jiaqing, LIU Huanxin, et al. Optimization of structure parameters of deep stope based on ANSYS-FLAC^{3D}[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(1):20-23.

[12] MILNE D, PAKALNIS R, GRANT D, et al. Interpreting hanging wall deformation in mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(7):1139-1151.

[13] R.特鲁曼,C.莫德利,N.哈里斯,等. 应用 Mathews 方法进行空场采矿法设计的经验[J]. 国外金属矿山, 2002(1):24-30.
TRUMAN R, MODLEY C, HARRIS N, et al. Experience in Australia with the application of the Mathews' method for open stope design[J]. Foreign Metal Mining Magazine, 2002(1):24-30.

[14] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978,15(4):211-215.

引用本文:钱兆明,郑斌,张来鑫,等. 废弃露天坑下深部复杂矿体采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):122-129.
QIAN Zhaomming, ZHENG Bin, ZHANG laixin, et al. Optimization of stope structural parameters for deep complex orebodies beneath abandoned open pits[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):122-129.

(上接第 121 页)

[9] 赵羿羽,孟德鑫,王传荣,等. 我国深海装备技术发展研究[J]. 船舶工程, 2024,46(7):128-135.
ZHAO Yiyu, MENG Dexin, WANG Chuanrong, et al. Research on the development of deep-sea equipment technology in China[J]. Ship Engineering, 2024,46(7):128-135.

[10] CHEN Y H, YANG C J, LI D J, et al. Study on 10 kVDC powered junction box for a cabled ocean observatory system[J]. China Ocean Engineering, 2013,27(2):265-275.

[11] 陈旭光,寇海磊,牛小东,等. 深海水下技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024,26(2):1-14.
CHEN Xuguang, KOU Hailei, NIU Xiaodong, et al. Development of deep-sea underwater technology and equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2024,26(2):1-14.

[12] 张来斌,武胜男,林蓉. 深水水下生产系统损伤监测及预警技术现状与发展趋势[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025,49(2):1-15.
ZHANG Laibin, WU Shengnan, LIN Rong. Status and development trends of damage monitoring and early warning technologies for deep-water subsea production systems[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025,49(2):1-15.

[13] 王彪,罗瑞龙,王芳,等. 深海无人装备控制系统研究现状与发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2025,33(3):390-399.
WANG Biao, LUO Ruilong, WANG Fang, et al. Research status and development trends of deep-sea unmanned equipment control system[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2025,33(3):390-399.

引用本文:王建华,郑皓. 近底层深海环境长期监测平台设计与海试应用[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):117-121.
WANG Jianhua, ZHENG Hao. Design and at-sea test of a long-term monitoring platform for near-bottom deep-sea environment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):117-121.